
Integrierte Navigationssysteme

Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation

von

Jan Wendel

Oldenbourg Verlag München Wien

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Lineare Systeme	5
2.1	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	7
2.2	Eigenwerte und Eigenvektoren	9
2.3	Lineare Systeme im Zeitdiskreten	15
2.4	Nichtlinearitäten	24
3	Inertiale Navigation	27
3.1	Koordinatensysteme	28
3.1.1	Das Erdmodell WGS-84	30
3.1.2	Transformationen	31
3.1.3	Nomenklatur	33
3.2	Lagedarstellungen	36
3.2.1	Eulerwinkel	37
3.2.2	Orientierungsvektor und Quaternion	38
3.2.3	Richtungskosinusmatrix	43
3.3	Strapdown-Rechnung	45
3.3.1	Lage	45
3.3.2	Geschwindigkeit	52
3.3.3	Position	60
3.4	Fehlercharakteristik eines Inertialnavigationssystems	60
3.4.1	Drehratensensoren	61
3.4.2	Beschleunigungsmesser	65
3.4.3	Generische Inertialsensorfehlermodelle	67
3.4.4	Kurzzeitcharakteristik	73
3.4.5	Langzeitcharakteristik	75
3.5	Initialisierung	78
4	Satellitennavigation	83
4.1	Systemüberblick Navstar GPS	83
4.2	Funktionsprinzip eines GPS-Empfängers	85
4.2.1	GPS-Signalstruktur	86

4.2.2	Akquisition	92
4.2.3	Tracking	94
4.3	GPS-Beobachtungsgrößen	99
4.3.1	Pseudorange	100
4.3.2	Trägerphasenmessung	104
4.3.3	Deltarange	106
4.3.4	Fehlerquellen	108
4.3.5	Differential GPS	109
4.4	Modernisierung des GPS-Systems	110
4.5	Galileo Systemüberblick	111
5	Grundlagen der Stochastik	117
5.1	Die Zufallsvariable	117
5.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte	117
5.1.2	Gaußverteilung	120
5.2	Stochastische Prozesse	123
5.2.1	Weißes Rauschen	124
5.2.2	Zeitkorreliertes Rauschen	125
6	Das Kalman-Filter	129
6.1	Kalman-Filter Gleichungen	130
6.1.1	Herleitung über normalverteilte Zufallsvektoren	130
6.1.2	Herleitung über Minimierung einer Kostenfunktion	134
6.1.3	Diskussion der Filtergleichungen	137
6.2	Beobachtbarkeit	140
6.3	Übergang kontinuierlich – diskret	141
6.4	Nichtlineare System- und Messmodelle	143
6.4.1	Linearisiertes Kalman-Filter	144
6.4.2	Erweitertes Kalman-Filter	146
6.4.3	Sigma-Point-Kalman-Filter	147
6.4.4	Kalman-Filter 2. Ordnung	156
6.5	Filterung bei zeitkorreliertem Rauschen	157
6.5.1	Erweiterung des Zustandsvektors	158
6.5.2	Messwertdifferenzen	159
6.6	Covariance Intersection	160
6.6.1	Bekannte Kreuzkorrelationen	161
6.6.2	Unbekannte Kreuzkorrelationen	163
6.7	Adaptive Filterung	167
6.7.1	Interacting Multiple Model Filter: Problemformulierung	168
6.7.2	Herleitung der IMM-Filtergleichungen	169

7	Monte-Carlo-Methoden	179
7.1	Chapman-Kolmogorov-Gleichung	179
7.2	Berücksichtigung von Beobachtungen	181
7.3	Partikelfilter	182
7.3.1	Repräsentation der WDF	182
7.3.2	Propagationsschritt	183
7.3.3	Estimationsschritt	183
7.3.4	Resampling	184
7.3.5	Simulationsergebnisse.....	186
8	Anwendungsbeispiel GPS/INS-Integration	191
8.1	GPS/INS-Integrationsstrategien	192
8.1.1	Loosely Coupled System	192
8.1.2	Tightly Coupled System	193
8.1.3	Ultra-Tight und Deep Integration.....	193
8.2	Entwurf eines Navigationsfilters.....	194
8.2.1	Systemmodell	194
8.2.2	Messmodelle	206
8.2.3	Korrektur der totalen Größen	214
8.2.4	Vergleich von Loosely Coupled und Tightly Coupled Systemen	215
8.3	Nutzung von Trägerphasenmessungen.....	219
8.3.1	Carrier Aided Smoothing	220
8.3.2	Festlegung der Trägerphasenmehrdeutigkeitswerte	221
8.3.3	Zeitlich differenzierte Trägerphasenmessungen.....	224
8.4	Verzögerte Verfügbarkeit von Messwerten	231
8.5	Integrity Monitoring	238
8.6	Sigma-Point-Kalman-Filter	239
8.6.1	Nichtlinearität eines Schätzproblems	240
8.6.2	Simulationsergebnisse.....	243
8.6.3	Theoretischer Vergleich mit Objektverfolgung	252
8.7	Fixed-Interval Smoother	254
8.7.1	Gleichungen des RTS Smoothers,	254
8.7.2	Simulationsergebnisse.....	256
9	Anwendungsbeispiel Transfer Alignment	259
9.1	Konventionelle Transfer-Alignment-Verfahren	259
9.2	Rapid Transfer Alignment	260
9.3	Effiziente Berücksichtigung von Zeitkorrelationen	263
9.3.1	Propagationsschritt	265
9.3.2	Messwertverarbeitung	266

9.3.3	Diskussion der Filtergleichungen	267
9.4	Numerische Simulation	268
9.4.1	Erzeugung von Inertialsensordaten	269
9.4.2	Ergebnisse	270
9.5	Adaptive Schätzung der Rauschprozessmodelle	274
9.5.1	Identifikation anhand von Messwertdifferenzen	275
9.5.2	Ergebnisse	278
10	Anwendungsbeispiel unbemanntes Fluggerät	281
10.1	Beobachtbarkeit des Yaw-Winkels	283
10.1.1	Stützung mit Erdmagnetfeldmessungen	285
10.2	Stabilisierung bei GPS-Ausfall	287
10.2.1	Systemmodell des Lagefilters	288
10.2.2	Stützung mit Beschleunigungsmessungen	288
10.3	Systemsimulation	289
10.3.1	Funktionsprinzip des Fluggeräts	290
10.3.2	Mathematisches Modell	292
10.3.3	Einfluss der Trajektoriendynamik	296
10.3.4	Schätzung von Modellparametern	297
10.3.5	Ergebnisse der Gesamtsystemsimulation	299
10.4	Experimentelle Verifikation	302
10.4.1	Kalibration der Beschleunigungsmesser	304
10.4.2	Ergebnisse	305
A	Sherman-Morrison-Woodbury-Formel	309
B	Differentiation von Spuren von Matrizen	313
C	MATLAB-Code zum Beispiel Abschnitt 7.3.5	315
Symbolverzeichnis		319
Literaturverzeichnis		325
Index		335